

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

4.1.-INTRODUCCIÓN

En este capítulo se exponen las conclusiones que se derivan de los distintos trabajos realizados a lo largo de esta tesina. Estas conclusiones se presentan en forma de conclusiones generales y de conclusiones específicas.

Las conclusiones generales corresponden al cumplimiento de los objetivos principales que han guiado el desarrollo de este estudio. Éstos se han dirigido en primer lugar al análisis de los diferentes aspectos que caracterizan la proyección como técnica de aplicación y de su situación actual en lo que a normativa se refiere.

Las conclusiones específicas son consecuencia del análisis de las consideraciones a tener en cuenta al aplicar hormigón armado proyectado, dichas consideraciones se derivan de resultados concretos y del repaso realizado a los aspectos que inciden sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad en dos secciones idénticas de hormigón armado en la que se varia la forma de aplicar el hormigón: proyección y vertido tradicional con posterior vibrado.

A continuación, y a falta de un estudio exhaustivo que respalde las mismas, se proponen una serie de recomendaciones que han podido extraerse a lo largo de este estudio.

Por último, se apuntan una serie de futuras líneas de investigación que han ido surgiendo durante el desarrollo del estudio, con el fin de que se siga profundizando en el conocimiento de este material.

4.2.-CONCLUSIONES GENERALES

Se recogen a continuación las conclusiones que con un carácter más general afectan a la proyección del hormigón entendida como técnica de aplicación.

- En lo que respecta al control de los materiales del hormigón proyectado, es decir, agua, áridos, cemento, aditivos y adiciones es análogo e idéntico al de un hormigón convencional, debiendo cumplir las mismas prescripciones en cuanto a calidad. No obstante, y aunque los materiales componentes son los mismos y deben cumplir las mismas prescripciones que un hormigón convencional, no se utilizarán en la misma proporción y de igual forma debido a las diferencias que introduce la puesta en obra del hormigón proyectado.
- La acción conjunta de aire incorporado al hormigón proyectado en estado fresco y el rebote de material (especialmente el de mayor tamaño) revierte en un mayor volumen de huecos en la mezcla, configurándose un hormigón en estado endurecido con propiedades diferentes al hormigón convencional.
- Así, serán habituales cementos de alta resistencia y endurecimiento rápido, tamaños máximos de árido limitados y relaciones agua/cemento sustancialmente inferiores a las de un hormigón convencional. No podemos obviar que el hormigón tal y como lo entendemos actualmente no es sino en el marco de las reacciones químicas que se desarrollan entre sus elementos, siendo de gran importancia el efecto de aditivos y adiciones. En esta línea son habituales en las dosificaciones de hormigón proyectado: las substituciones parciales de cemento por microsilíce con el fin de reducir el rebote y aumentar parámetros como adherencia y resistencia; acelerantes de fraguado, reductores de retracción y, superplastificantes para lograr una adecuada trabajabilidad de la mezcla que garantice en todo momento la consistencia y homogeneidad del material.
- Con el conocimiento actual de los materiales y los distintos aditivos se pueden alcanzar prestaciones equivalentes al hormigón convencional con hormigón proyectado, presentándose éste último en numerosas aplicaciones como el más conveniente dado los elevados rendimientos que permite alcanzar.
- A nivel de normativa y en lo que respecta a aspectos tan primigenios como por ejemplo la dosificación del hormigón proyectado, no existe consenso universal al respecto, siendo las principales normativas de principios de los años 90 y habiendo quedado lógicamente superadas por estudios posteriores, en parte, por los grandes avances que permite el desarrollo de aditivos para el hormigón.
- A nivel estatal, destacamos la norma UNE 83-600/94 y UNE 83-607/94 que presentan una clasificación de acuerdo con su función estructural y la edad del hormigón, siendo la clasificación bastante ambigua conforme el primer criterio. En este sentido se considera necesario la presencia del hormigón proyectado en un marco de instrucción acorde a las aplicaciones actuales que se llevan a cabo con el material, siendo necesaria su inclusión en normas del rango de la actual EHE 08 o Eurocódigos.

- Si ya en la década de los 80 la química aplicada al hormigón fue la responsable del gran impulso que experimentó el material en el contexto de las obras subterráneas y túneles (N.A.T.M) parece que 20 años después sigue siendo esta disciplina la que junto con los especiales condicionantes que rodean la construcción en espacios confinados y obras subterráneas se presente como alternativa en muchos casos al hormigón convencional, resultando más atractiva si atendemos a criterios económicos, temporales y de seguridad en el trabajo.
- En este contexto se destaca cada vez más la solución conjunta entre elementos de contención (pantallas continuas y pantallas de pilotes en terrenos rocosos) y elementos de rigidización tipo anillo que lejos de ser los delgados sostenimientos que propone el N.A.T.M para la construcción de túneles en roca, conforman auténticas secciones de hormigón estructural, con la peculiaridad de poder prescindir de todas las actuaciones asociadas al hormigón convencional, esto es: eliminación de todas las tareas de encofrado y desencofrado así como de sus riesgos derivados de la movilización de paneles mal cerrados durante el vertido y la ausencia de tareas de gran complejidad como el vibrado en el interior de los moldes.
- A nivel de normativa actual, se echa en falta la presencia de legislación específica para elementos estructurales ejecutados con hormigón proyectado. Cada vez más se considera el hormigón proyectado en soluciones estructurales, ya sea reforzado con fibras metálicas o directamente materializando elementos de hormigón armado. En este sentido se considera necesaria la formación de un marco legal que permita a proyectistas y constructores decantarse por un material que a día de hoy se encuentra en España fuera de norma.
- El modelo utilizado actualmente para el cálculo de la fluencia y la retracción, contemplado en la EHE 08, permite calcular dichas deformaciones a partir de vincularlas a la resistencia característica del hormigón. En este sentido se destaca el hecho de no introducir otras variables implicadas en estos procesos como son las relativas a la pasta de cemento (relación agua/cemento, principalmente).
- De cara a poder introducir en los modelos de cálculo de dichos fenómenos, aspectos vinculados a la proyección del material, se adoptan, por presentar una mayor semejanza con el hormigón autocompactable, los mismos coeficientes correctores que para un HAC tal y como proponen los últimos estudios realizados en este ámbito.
- A diferencia de otros métodos más complejos para la determinación de retracción y fluencia, el método de la EHE 08 permite evaluar ambos procesos en la fase de proyecto, cuando generalmente aspectos como la dosificación final o la relación agua/cemento son todavía desconocidos. Esto se debe a la fuerte dependencia del método respecto a la resistencia característica del hormigón, si bien cabe resaltar que será el único dato conocido en ese momento.
- Se destaca en elementos de hormigón armado proyectado, la acción del efecto pantalla que ejerce la armadura frente a la trayectoria del hormigón, siendo responsabilidad del operario gunitador, la variación del ángulo y la distancia de

proyección para asegurar una correcta adherencia alrededor de toda la armadura. En este sentido la existencia de zonas densamente armadas puede dar lugar a zonas con menor adherencia entre el hormigón y el acero, fruto de la aparición de bolsas de lechada inducidas por la acción conjunta del rebote y del efecto pantalla.

- En lo que a durabilidad se refiere, se seguirán los mismos criterios establecidos que en el hormigón armado convencional. En este sentido, será fundamental garantizar contenidos mínimos de cemento y relaciones máximas agua/cemento en aras de garantizar una compacidad en el hormigón que propicie una adecuada protección frente a la agresividad físico-química de los agentes agresivos, especialmente en la zona de piel del elemento estructural. Adicionalmente se dispondrán los recubrimientos nominales establecidos en la EHE 08, en función de la clase de exposición y el nivel de control establecido.

4.3.-CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

4.3.1.-Relativas a resistencia y comportamiento tenso-deformacional

Se recogen en este apartado las principales conclusiones y diferencias a tener en cuenta en relación a parámetros de resistencia y deformación entre un hormigón armado proyectado y un hormigón armado convencional (encofrado y vibrado).

- ✓ La incorporación de aire como elemento responsable del transporte del hormigón, así como el efecto del rebote al impactar contra el soporte, producen sustanciales diferencias entre el hormigón amasado y el hormigón finalmente colocado a través de proyección.
- ✓ Las principales variaciones debidas a la proyección consisten en una mayor porosidad respecto el hormigón armado convencional y en un menor peso específico asociado a un mayor volumen de huecos. Este condicionante incide directamente en el cálculo dado la implicación que tiene el peso específico del hormigón en la determinación de los esfuerzos producidos por la acción del peso propio.
- ✓ Así, el peso específico seco se estima en 2,2 g/cm³ y la porosidad en torno al 15%, mientras que en un hormigón convencional estos valores se sitúan en 2,4 g/cm³ y 4-6% respectivamente. Este aspecto, más allá de tener una implicación en el cálculo tiene un efecto sobre los aspectos de durabilidad del material debido a la porosidad extra introducida por el proceso de colocación.
- ✓ Mediante hormigón armado proyectado se pueden alcanzar valores de resistencia a compresión análogos a los obtenidos en hormigón armado convencional, para ello es necesario disponer mayores contenidos de cemento y adaptar el esqueleto granular a criterios de máxima compacidad. De este modo los valores medios de resistencia obtenidos para las dosificaciones ensayadas son los siguientes: 38,5MPa en la dosificación H1; 40,1MPa en la dosificación H2; 33,5MPa en la dosificación H3, y 46,0MPa en la dosificación H4.

- ✓ En el hormigón armado proyectado, la limitación de tamaño máximo del árido a 12mm para garantizar una proyección sin obstrucciones y el mayor volumen de pasta, dan lugar a un esqueleto granular más flexible y por tanto a valores de módulo de deformación menores. En este sentido los valores obtenidos registran disminuciones respecto al valor que cabría esperar para un hormigón convencional de igual resistencia característica, calculado a través de la fórmula propuesta en la EHE.
- ✓ Los valores obtenidos para el módulo en las dosificaciones ensayadas son los siguientes: 26,5GPa en la dosificación H1; 27,4GPa en la dosificación H2; 25,3GPa en la dosificación H3, y 27,4GPa en la dosificación H4.
- ✓ El fenómeno de la retracción es más acusado en hormigones armados proyectados debido a la mayor cantidad de pasta respecto a un hormigón armado convencional de análoga resistencia.
- ✓ A falta de modelos para evaluar la retracción en hormigón proyectado, se cree más oportuno recurrir a algún modelo de los utilizados en HAC. Hecha esta consideración, si bien la porosidad del proyectado es mayor a la de un HAC, parámetros relacionados con la dosificación como el contenido de pasta, serán más parecidos a un HAC que a un hormigón convencional.
- ✓ Cabe decir que los efectos de la retracción tienen un eco sobre la durabilidad del material ya que una fisuración excesiva a tempranas edades supone una pérdida de resistencia a la penetración de agentes agresivos.
- ✓ En relación a la fluencia, se observa un comportamiento similar al de la retracción ya que se trata de un fenómeno directamente vinculado al volumen de huecos en la pasta de cemento. En este sentido, el enriquecimiento de cemento que se produce en hormigón proyectado al impactar contra el soporte, consecuencia del rebote, da lugar, a igualdad de otros parámetros, a deformaciones por fluencia mayores.
- ✓ El fenómeno de fluencia es extremadamente difícil de cuantificar y a día de hoy no se dispone de modelos para hormigón proyectado así que se recurre de forma análoga al cálculo de la retracción, utilizando, por “semejanza”, modelos desarrollados para hormigones autocompactables.
- ✓ Se han calculado los coeficientes de Poisson en las cuatro dosificaciones ensayadas obteniendo valores en torno a 0,120 y 0,155, es decir inferiores al valor medio de $\nu=0,2$ que recomienda tomar la EHE 08.
- ✓ A falta de ensayos específicos sobre el coeficiente de dilatación, se tomará el mismo valor que en el hormigón armado convencional pese a que como bien indica la Instrucción puede variar en proporciones elevadas, dependiendo fundamentalmente de la naturaleza del cemento, de los áridos y de su dosificación.

4.3.2.-Relativas a la durabilidad

Se reseñan a continuación algunos aspectos relacionados con la durabilidad del material.

- ✓ De forma general se aplicarán los mismos criterios de durabilidad que en hormigones convencionales. En este sentido es necesario en hormigones armados proyectados garantizar contenidos mínimos de cemento y relaciones agua/cemento máximas, así como asegurar los recubrimientos nominales establecidos en la EHE 08 en función de la clase de exposición y el nivel de control. Todo ello con la finalidad de proteger al hormigón de ataques físico-químicos, especialmente en la zona de piel del elemento estructural.
- ✓ Se ha comprobado como el contenido de cemento en cualquier dosificación de hormigón proyectado es, a igualdad de resistencia y otros factores, superior al empleado en el hormigón convencional. Este efecto se debe al enriquecimiento de cemento que se produce durante la proyección con el fin de absorber las diferencias entre material amasado y material colocado por la acción del rebote. En lo que se refiere a relaciones agua/cemento el hormigón armado proyectado está generalmente por debajo de los valores considerados en la tabla 37.2.3.a.
- ✓ Con el objetivo de garantizar la geometría y recubrimientos nominales establecidos será necesario un nivel de control intenso durante la ejecución. En este sentido y dado que la proyección del material podría producir movimiento en los separadores tradicionalmente utilizados en hormigón moldeado, se dispondrá otro sistema para materializar dichos recubrimientos. Una solución habitual para control de espesores es la instalación de clavos galvanizados perfectamente fijados y colocados estratégicamente.
- ✓ La forma más adecuada de reducir dichos ataques es garantizar la impermeabilidad del hormigón, si bien este mecanismo no es el único que interviene en los procesos de degradación del material. En este sentido la EHE 08 establece como parámetro de control en hormigones convencionales el valor de la profundidad media y máxima de penetración de agua bajo presión según las clases de exposición. Tras la realización del ensayo sobre tres muestras de hormigón proyectado, se han obtenido valores superiores en todos los casos.
- ✓ A la vista de lo anterior, se concluye que las prestaciones en lo que respecta a durabilidad en un elemento de hormigón armado proyectado no son equivalentes al hormigón armado convencional. De cara a establecerse como una alternativa al hormigón convencional se baraja por un lado adoptar soluciones drenantes en el contacto de la cara posterior así como la disposición de recubrimientos nominales mayores a los establecidos en hormigón armado convencional.
- ✓ Destacamos la dificultad de materializar los recubrimientos nominales, no tanto en la cara de proyección como en la cara posterior, en unas ocasiones en contacto con elementos de hormigón existentes, en otras directamente con el terreno.

4.3.3.-Relativas a la ejecución

A continuación se presentan una serie de aspectos de carácter estético y de acabado, asociados a la colocación del material.

- ✓ Será fundamental en elementos de hormigón armado proyectado, en los que dispondremos habitualmente de una o ninguna cara de encofrado, garantizar una adecuada adherencia entre el soporte y el material de proyección. Será por tanto responsabilidad del proyectista evaluar la necesidad de aplicar tratamientos previos sobre el soporte a fin de garantizar la movilización de fuerzas adherentes en el contacto que eviten desprendimientos de material.
- ✓ El acabado rugoso del hormigón proyectado propicia una mayor retención de polvo y suciedad, lo cual puede redundar, a medio plazo, en un mayor coste de mantenimiento asociado a tratamientos de limpieza. Para evitarlo se pueden realizar enfoscados con el propio material en estado fresco o bien disponer morteros de reboco o acabado que supondrían efectos favorables en términos de durabilidad.
- ✓ La solución estructural con hormigón armado proyectado se perfila como una alternativa de lo más interesante al hormigón convencional, especialmente en casos en los que el nivel de acabado no es determinante y se pretenden altos rendimientos.
- ✓ La ejecución de una sección estructural mediante hormigón proyectado requerirá en la mayoría de casos una ejecución por capas que dará lugar a la formación de juntas frías. En este sentido se antoja de suma importancia garantizar la movilización del esfuerzo rasante entre capas a fin de garantizar un comportamiento monolítico de la sección.
- ✓ Se requerirá un elevado nivel de control así como la máxima formación y experimentación de los operarios a fin de lograr mediante hormigón armado proyectado prestaciones equivalentes al hormigón armado convencional.

4.4.-LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Debe entenderse esta tesina como unas consideraciones mínimas generales sobre una alternativa a la forma tradicional de ejecutar las secciones estructurales. En este sentido se trata del primer paso en el conocimiento de un nuevo material estructural.

Dado que a nivel de aspectos como dosificación, ejecución y control de calidad del hormigón proyectado, se encuentran perfectamente desarrollados en guías y normas de ensayo, se recomienda el desarrollo de modelos de cálculo para determinar, con mayor fidelidad a la puesta en obra, parámetros tenso-deformacionales como el módulo, la retracción y la fluencia de cara a obtener estructuras de hormigón armado proyectado con el mismo nivel de definición que en hormigones armados convencionales.